气候因素和人类活动对砒砂岩区植被净初级生产力的影响

王怡恩[1,2]， 饶良懿[1,2]

（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 北京林业大学水土保持国家林业和草原局重点实验室，北京 100083）

摘 要：砒砂岩区是黄土高原水土流失最严重的地区之一，其植被生长状况对该区控制土壤侵蚀和维护生态平衡起着重要作用。本文基于CASA模型和Rclimdex 1.0分别计算了2001—2021年砒砂岩区植被净初级生产力NPP和18个极端气候指数，采用趋势分析、相关分析、随机森林重要性排序、残差分析等研究了砒砂岩区NPP时空变化及其对气候因素的响应特征，并量化了气候因素和人类活动对砒砂岩区NPP的相对贡献。结果表明：(1) 2001—2021年砒砂岩区NPP变化呈显著增加趋势，但未来82.5%的区域NPP将由增加趋势变为减少趋势。(2) 年际尺度上，砒砂岩区NPP与年均气温、年总降水量、极端强降水指数主要呈正相关，与冷夜日数TN10P、气温日较差DTR呈负相关。季节尺度上，春季均温以及暖夜日数增加有利于NPP增加，且存在滞后影响。夏季暖昼日数增加不利于植被生长，且NPP对夏季暖昼日数存在3个月的滞后响应。夏季极端强降水有利于NPP增加，而夏季干旱不利于植被生长，且NPP对持续干燥日数CDD存在3个月的滞后响应。(3) 气候因素和人类活动共同促进了砒砂岩区NPP增加，裸露区和覆沙区气候贡献占主导地位，气候因素相对贡献为62.13%和60.06%，覆土区以人类活动贡献为主导，人类活动贡献率为60.40%。

关键词：砒砂岩区；植被净初级生产力(NPP)；极端气候；人类活动；残差分析

植被净初级生产力NPP是植物光合作用所固定有机质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分，即绿色植物在单位面积和单位时间内积累有机物的数量[1]。NPP作为植被生态系统中物质循环和能量流动的基础，与生态系统功能紧密相关，反映出植物群落在自然环境条件下的生产力，是评价植被生态系统可持续发展的重要生态指标，是判定生态系统碳源/汇的主要因子[2]。气候因素和人类活动是影响NPP的两个重要驱动因素[3]。已有研究表明，人为土地利用管理是全球植被变绿的重要驱动因素，贡献了三分之一的植被叶面积增量，尤其在中国和印度[4-5]。而无直接土地利用变化影响的地区，各生态系统植被变化在大多数情况下可归因于气候系统变量的趋势[6]。在大多数区域植被同时受到气候因素和人类活动的影响，影响程度因地区而异。因此，量化气候变化和人类活动对植被变化的相对贡献，有利于区域植被的进一步保护、建设和管理，同时对理解区域植被动态变化成因，制定合理的区域生态恢复策略具有重要意义。

气候因素中温度和降水是影响植物生长最直接和关键的气候因子[7]，许多研究分析了平均气候因素对NPP变化的影响[8-9]，一般来说，在干旱和半干旱地区，降水增多对水分限制区植被产生积极影响。在北半球高纬度等热量限制区，温度升高减轻了温度对植被生长的限制，进而有利于NPP增加[10-11]。与平均气候相比，极端气候对NPP的影响较少被关注，但是NPP对极端气候的响应可能更为敏感[12]。2000—2009年干旱导致全球陆地净初级生产减少[13]，暴雨和长时间降雨也会限制植物呼吸和光合作用[14]。另一方面，人类活动也是影响植

收稿日期：2023-05-30； **修订日期**：2023-08-04
基金项目：北京市科技新星计划(2006A22)；国家重点研发计划“砒砂岩区复合土壤侵蚀综合治理技术(2017YFC0504503)”
作者简介：王怡恩(2001-)，女，硕士研究生，研究方向为植被生态遥感. E-mail: en2530111097@163.com
通讯作者：饶良懿. E-mail: raoliangyi@bjfu.edu.cn

被NPP变化的重要原因，生态恢复成效在不同区域可能存在差异。在我国黄土高原[15]，横断山区[16]等区域人类活动是NPP增加的主要原因，表明生态修复工程对改善植被NPP起着重要的作用。三峡库区实施的生态修复工程有效缓解了气候变化的不利影响，主导了森林恢复，而中下游地区快速的城市化则导致了森林退化[17]。虽然，已有许多研究量化了气候变化与人类活动对植被NPP变化的相对贡献，但大多数NPP预测模型是基于降水和温度等平均气候因子，同时考虑极端气候作为气候因素的研究较少。因此，本文考虑极端气候指数以量化气候因素和人类活动对植被NPP变化的相对贡献，可在一定程度上减少气候因素对植被变化解释的不准确性。

砒砂岩区位于晋、陕、蒙三省交界处，是黄河中游剧烈侵蚀区，其基岩成岩程度低、胶结程度差，无水时坚硬如磐石，遇水则溃散如泥，该区域水土流失严重，是黄河中游粗泥沙的主要来源区，生态环境极为脆弱[18]。目前，针对砒砂岩区NPP的研究较少，平均气候、极端气候及人类活动对该区NPP变化的影响尚不明晰。因此，本文采用CASA模型估算砒砂岩区NPP，分析砒砂岩区NPP时空变化及其对平均气候和极端气候的响应，并结合随机森林重要性排序结果，考虑极端气候指数进行多元残差分析，量化气候因素和人类活动对砒砂岩区NPP变化的相对贡献，以期为砒砂岩区应对气候变化下的植被恢复工作提供相应的科学依据，为砒砂岩区生态环境建设及黄河流域高质量发展提供参考。

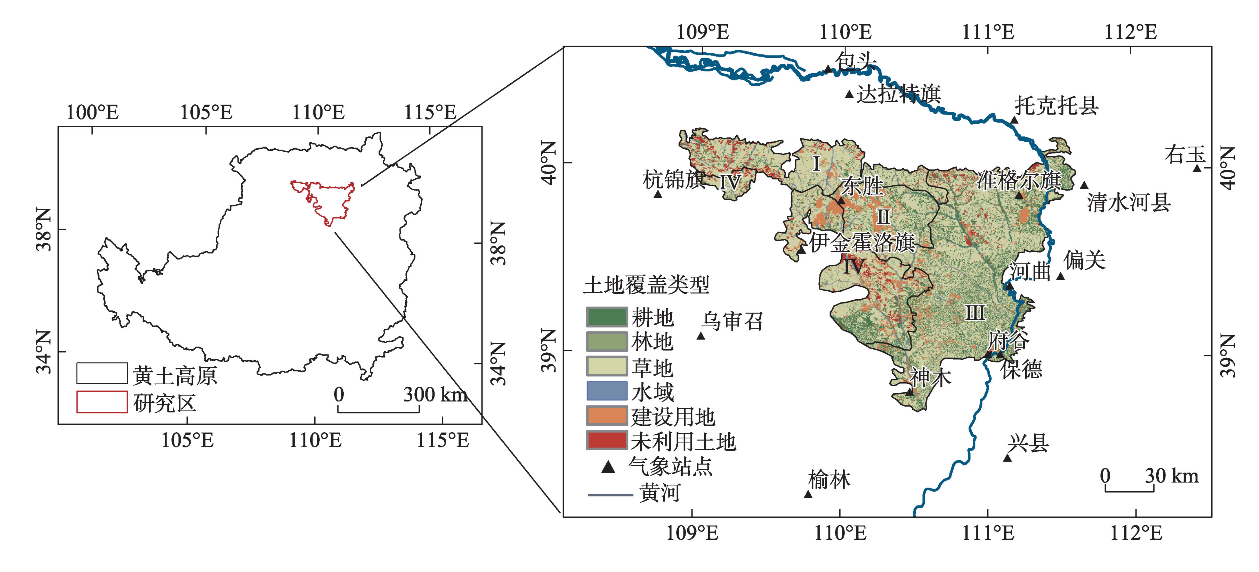
1 数据与方法

1.1 研究区概况

砒砂岩区位于38°42′~40°12′N，108°52′~111°35′E之间，属于黄土高原北部，陕、晋、蒙三省交界的鄂尔多斯高原(图1)，面积约1.67×10⁴ km²。地势西北高东南低，地表沟壑纵横，土壤侵蚀严重，生态环境脆弱，是黄土高原水土流失最为严重的区域之一。砒砂岩按覆土程度可分为裸露区、覆土区、覆沙区，根据侵蚀程度又分为剧烈侵蚀裸露区和强度侵蚀裸露区。砒砂岩区年均气温6~9 ℃，年均降水量315~442 mm，为温带干旱半干旱大陆季风气候，气候干燥，降水多集中于夏季，占全年降雨量的70%左右。2020年砒砂岩区草地面积占总面积的61.7%，林地占4.81%，耕地占18.59%，其他土地覆盖类型占14.9%(图1)，砒砂岩区植被类型以草地为主。

1.2 数据来源及处理

NDVI数据来源于GEE平台MOD13Q1数据(https://code.earthengine.google.com/)，空间分辨率为250 m，时间范围为2001—2021年，时间分辨率为16 d。DEM数据下载于中国科学院地理空间数据云ASTER GDEM数据(https://www.gscloud.cn/)，空间分



注：Ⅰ为裸露区(强度侵蚀)；Ⅱ为裸露区(剧烈侵蚀)；Ⅲ为覆土区；Ⅳ为覆沙区。下同。

图1 砒砂岩区2020年土地利用类型及位置示意图

Fig. 1 Land cover types in 2020 and map of geographical location in the Pisha sandstone area

辨率为30 m。土地覆盖类型数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所(https://www.resdc.cn/)。气象站点数据来自中国气象数据网(https://data.cma.cn/),为了保证空间插值结果更加精确,本研究选取了砒砂岩区及其周边17个气象站点,获得2001—2021年的气温、降水量和日照时数数据,由于太阳辐射站点较少,采用日照时数和纬度的经验公式[19]计算太阳辐射。极端气候指数从ETCCDI(Expert Team for Climate Change Detection and Indices)所提供的极端气候指标体系中选择了10个极端气温指数和8个极端降水指数(表1),并利用Rclimdex 1.0计算18个极端气候指数。最后统一利用ANUSPLIN软件进行空间插值,得到气象栅格数据。

1.3 研究方法

1.3.1 NPP的估算 本文采用朱文泉等[1]改进的CASA模型估算砒砂岩区NPP。CASA模型通过植物吸收的光合有效辐射(APAR)和光能利用率(ε)估算NPP,计算参数少,并已得到广泛应用[20-21],具体计算方法见文献[20,22]。

1.3.2 Sen+M-K趋势分析 本文采用Theil-Sen Median非参数趋势计算方法,逐像元计算砒砂岩区NPP年变化趋势。该方法已广泛用于分析长时间序列数据的趋势变化[23]。计算公式为:

$$\beta = \mathrm{median}\frac{\mathrm{NPP}_j - \mathrm{NPP}_i}{t_j - t_i},\ 2001 \leqslant i < j \leqslant 2021 \tag{1}$$

式中:median表示中位数函数;β表示NPP的变化趋势;NPP_i和NPP_j表示不同年份的NPP数据;t_i和t_j为时间序列。当$\beta>0$时,表示NPP呈上升趋势;$\beta<0$时,则表示存在下降趋势。并采用Mann-Kendall检验(简称M-K检验)对趋势分析结果进行显著性检验。

1.3.3 Hurst指数 Hurst指数用于预测时间序列数据的未来变化趋势,Hurst值(H)用于判断未来变化趋势,$0 \leqslant H<0.5$,表明未来变化趋势与过去相反。$0.5<H \leqslant 1$,表明未来变化趋势与过去一致。$H=0.5$,表明时间序列为随机序列,未来趋势不确定。将NPP变化趋势与Hurst值叠加,以确定砒砂岩区NPP未来趋势。

1.3.4 相关分析 采用Pearson方法分析砒砂岩区2001—2021年NPP与气候因子的相关性,计算公

表1 极端气候指数

Tab. 1 Definition of extreme climate indices

类别	代码	名称	定义	单位
极端气温冷极值	TN10P	冷夜日数	日最低气温<10%分位值的日数	d
	TX10P	冷昼日数	日最高气温<10%分位值的日数	d
	TNn	日最低气温极小值	每月内日最低气温的最小值	℃
	TXn	日最高气温极小值	每月内日最高气温的最小值	℃
极端气温暖极值	TN90P	暖夜日数	日最低气温>90%分位值的日数	d
	TX90P	暖昼日数	日最高气温>90%分位值的日数	d
	TNx	日最低气温极大值	每月内日最低气温的最大值	℃
	TXx	日最高气温极大值	每月内日最高气温的最大值	℃
其他气温指数	DTR	气温日较差	最高气温与最低气温的差值	℃
	GSL	生长季长度	日平均气温第一次连续6 d以上大于5 ℃至日平均气温第一次(6月1日后)连续6 d小于5 ℃的日数	d
极端降水指数	PRCPTOT	雨日降水总量	雨日(日降水量≥1 mm)降水总量	mm
	RX1day	1 d最大降水量	每月最大1 d降水量	mm
	RX5day	5 d最大降水量	每月连续5 d最大降水量	mm
	R95P	强降水量	每年日降水量>95%分位值的总降水量	mm
	R99P	极强降水量	每年日降水量>99%分位值的总降水量	mm
	SDII	年均雨日降水强度	降水量≥1 mm的总量与总日数的比值	$\mathrm{mm \cdot d^{-1}}$
	CDD	持续干燥日数	日降水量<1 mm的最长连续日数	d
	CWD	持续湿润日数	日降水量≥1 mm的最长连续日数	d

式为:

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(x_i-\bar{x}\right)\left(y_i-\bar{y}\right)\right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\bar{y}\right)^2}} \quad (2)$$

式中:R为x、y两变量的相关系数;x_i为第i年NPP值;y_i为第i年所分析的气候指数值;$\bar{x}$表示多年NPP平均值;$\bar{y}$表示多年所分析的气候指数平均值。n为样本数,即21。

1.3.5 随机森林重要性排序 随机森林(RF)是一种基于分类和回归的机器学习算法,能够用来分析自变量与因变量之间复杂的非线性关系[24]。本研究使用随机森林来识别各个极端气候对砒砂岩区NPP的影响程度,利用R4.2.1中的RandomForest包执行RF算法,得到增长的错误率平方均值%IncMSE,即Increased in Mean Squared Error (%),表示某一变量的剔除对目标预测准确度的影响,%IncMSE值越大重要性越高,用以直观反映各极端气候指数对目标变量(NPP)的重要程度。

1.3.6 多元线性回归残差及相对贡献分析 多元线性回归残差分析可用于区分气候因素和人类活动对NPP变化的影响,已得到较为广泛的使用[25-26]。一般来说,多元回归残差分析选取平均气候变量如总降水量和平均气温作为气候因素[27-28],忽略了极端气候对植被的影响,可能导致对气候贡献估计的不准确性[29]。因此,本研究将极端气候指数考虑进来,以年均气温、年总降水量和极端气候指标为自变量,NPP为因变量进行多元回归残差分析,并结合相对贡献分析方法[30],计算气候因素和人类活动对砒砂岩区NPP变化的相对贡献。步骤如下:(1)以NPP为因变量,年均温度TEM、年总降水量PRE、极端气候指数incidex为自变量,建立多元线性回归模型(公式3),其中,incidex为随机森林重要性排序对砒砂岩区NPP影响程度最高的极端气候指数,a,b,c,ε为模型参数。NPP_{cc}为逐年NPP预测值,表示气候因素对植被NPP的影响。(2)计算NPP_{obs}(CASA模型模拟的年均NPP值)与NPP_{cc}之间的差值(公式4),即NPP_{HA},表示人类活动对植被NPP的影响。

$$NPP_{cc}=a\times PRE+b\times TEM+c\times incidex+\varepsilon \quad (3)$$

$$NPP_{HA}=NPP_{obs}-NPP_{cc} \quad (4)$$

(3)计算2001—2021年NPP_{cc}和NPP_{HA}的线性趋势率,即$Slope(NPP_{cc})$和$Slope(NPP_{HA})$,以及NPP的趋势率$Slope(NPP_{obs})$,并根据表2计算气候因素和人类活动的相对贡献率。

2 结果与分析

2.1 NPP模拟和气象插值结果评估

分别在CASA模型估算的年NPP和MODIS NPP数据集中随机抽取100个像元,共获得2100(21×100)个样本,表现出较好的拟合结果(图2a),基于CASA的NPP值与MOD17A3 NPP呈显著相关性,R^2为0.7068($P<0.01$),具有一定的统计学意义。同时,本文模拟砒砂岩区NPP年均值为197.68 g C·m^{-2}·a^{-1},该结果与刘洋洋等[31]在黄土高原较大尺度的砒砂岩区NPP估算范围一致。整体上,本文基于改进的CASA模型估算砒砂岩区植被净初级生产力精度较高。

采用交叉检验进行气象数据插值精度误差检验,选取砒砂岩区空间分布均匀的4个气象站点作为检验样点,剩余的作为训练样点进行空间插值。

表2 气候因素和人类活动相对贡献率计算方法

Tab. 2 Methods for calculating relative contribution rates of climate factors and human activities

$slope(NPP_{obs})$	驱动因素	驱动因素的划分标准		驱动因素的贡献率/%	
		$slope(NPP_{cc})$	$slope(NPP_{HA})$	气候变化	人类活动
>0	CC&HA	>0	>0	$\frac{slope(NPP_{cc})}{slope(NPP_{obs})}$	$\frac{slope(NPP_{HA})}{slope(NPP_{obs})}$
	CC	>0	<0	100	0
	HA	<0	>0	0	100
<0	CC&HA	<0	<0	$\frac{slope(NPP_{cc})}{slope(NPP_{obs})}$	$\frac{slope(NPP_{HA})}{slope(NPP_{obs})}$
	CC	<0	>0	100	0
	HA	>0	<0	0	100

本研究选取东胜、保德、清水河、河曲4个站点作为检验样点。结果如图2所示，年均温度(R^2=0.77，P<0.01)和年降水量(R^2=0.69，P<0.01)与实测值拟合效果良好，气象数据插值精度较高。

2.2 砒砂岩区NPP时空变化

如图3所示，在时间变化趋势上，2001—2021年间砒砂岩区年均NPP增长速率为5.78·a^{-1}(P<0.001)，NPP总体呈波动上升趋势，且砒砂岩各区域NPP波动情况相似，均呈显著上升趋势。其中，覆土区NPP增长最快，增速达7.02·a^{-1}，裸露区NPP增长速率最小，为3.72·a^{-1}。在空间分布上，2001—2021年NPP平均值与覆土程度密切相关，表现为砒砂岩NPP裸露区(157.45 g C·m^{-2}·a^{-1})<覆沙区(203.57 g C·m^{-2}·a^{-1})<覆土区(217.38 g C·m^{-2}·a^{-1})。

在空间变化趋势上(图4a)，2001—2021年约96.94%的区域NPP呈增加趋势，84.60%的区域呈显著增加趋势。不显著增加的区域(12.34%)主要位于裸露区。结果表明，2001—2021年间砒砂岩区NPP明显增加，植被生长状况明显改善。进一步计算Hurst指数，得到砒砂岩区2001—2021年植被Hurst值的平均值为0.45，表明未来NPP的变化主要表现为反可持续性。在未来空间变化趋势上(图4b)，82.50%的区域NPP由增加变为减少，1.96%的区域持续减少，14.44%的区域持续增加，1.1%的区域由减少变为增加。这一结果表明，植被生长未来因气候变化和人类活动易发生退化，为了促进砒砂岩区植被长期稳定生长以及区域生态环境可持续发展，巩固当前生态恢复工程已有成效，仍需要加强对砒砂岩区植被的保护力度，实施适合该区域的可持续性发展的植被生态恢复工程。

2.3 砒砂岩区NPP对气候因素的年际响应

2.3.1 年NPP与气温的相关性 图5显示，砒砂岩区年NPP与气温因子的空间平均相关系数绝对值均在0.3以下，呈弱相关关系。具体而言，与NPP相

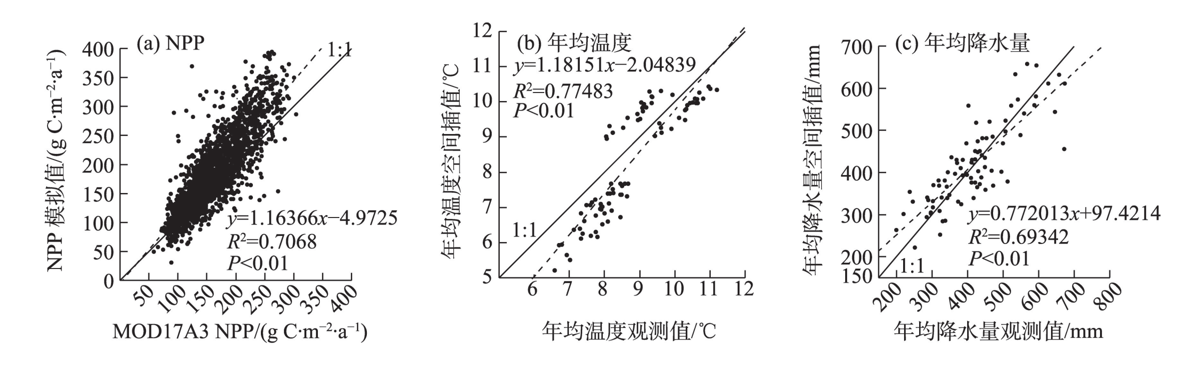


图2 净初级生产力与气象数据精度验证

Fig. 2 Accuracy verification of net primary productivity and meteorological data

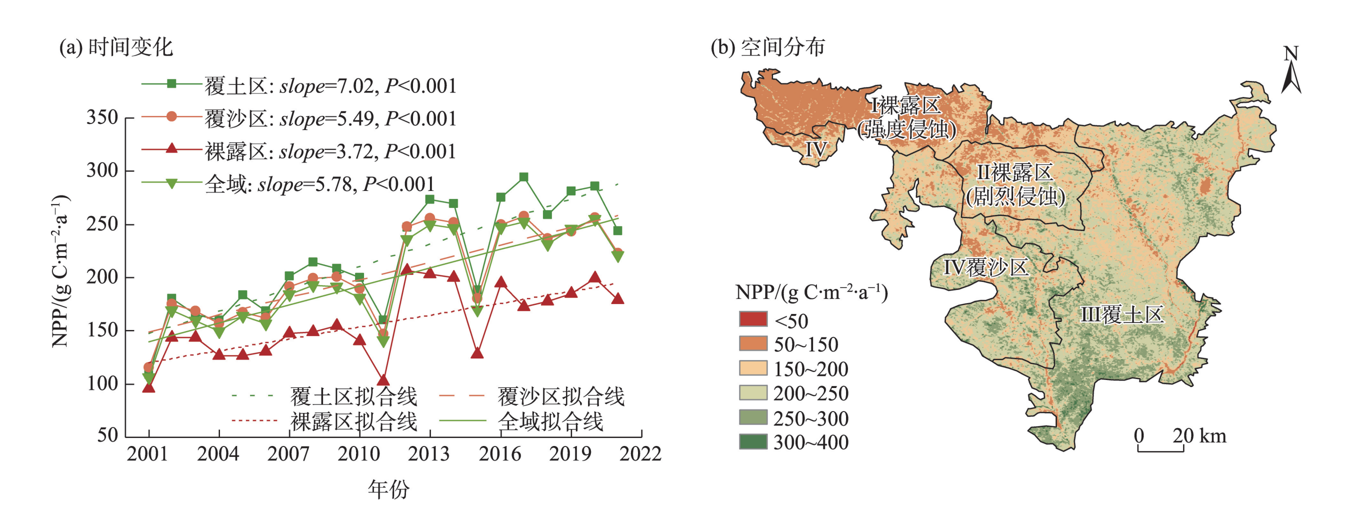


图3 2001—2021年NPP时间变化趋势及空间分布

Fig. 3 Temporal trends and spatial distribution of NPP from 2001 to 2021

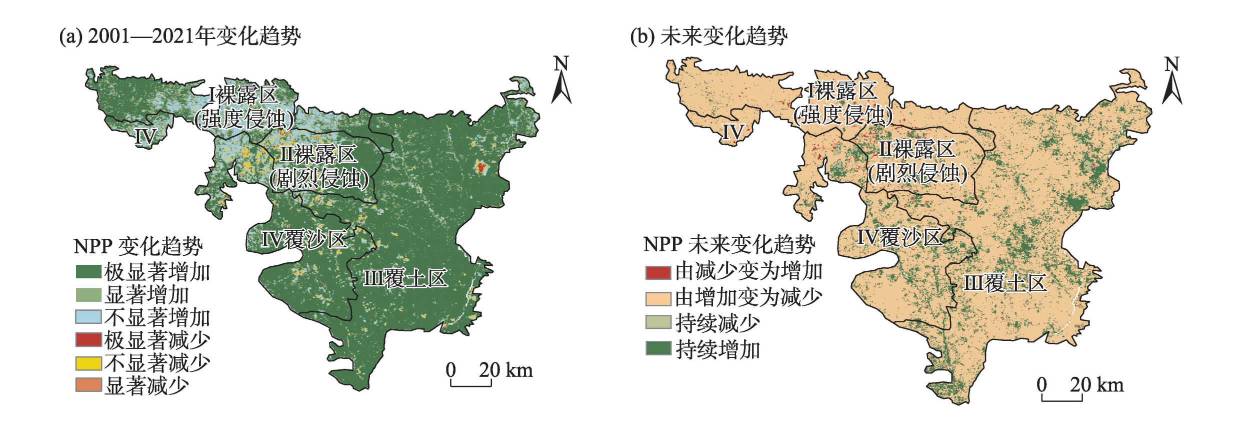


图4 2001—2021年NPP空间变化趋势及NPP未来变化趋势

Fig. 4 Spatial trends of NPP from 2001 to 2021 and future trends of NPP

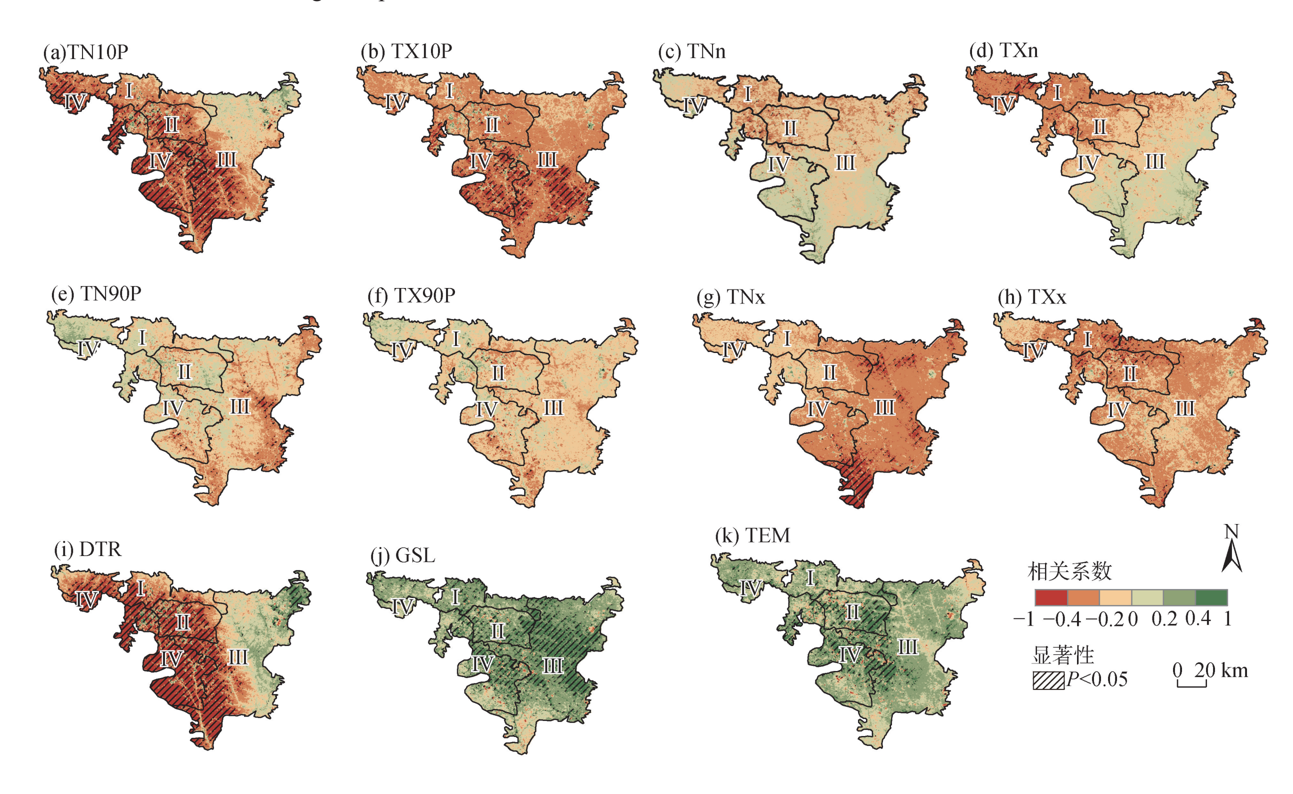


图5 砒砂岩区NPP与极端气候指数相关系数的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of correlation coefficients between NPP and extreme climate index in the Pisha sandstone area

关性通过显著性检验面积占比较大的指标为冷夜日数TN10P、气温日较差DTR、年均温度TEM与生长季长度GSL。TEM、GSL与NPP以正相关关系为主,表明年均温升高与生长期延长有利于砒砂岩区植被生长。TN10P、DTR与NPP以负相关关系为主,表明随着冷夜日数TN10P的增加,可能导致植被积温不足,影响植被生长。而气温日较差DTR是日最高气温与最低气温的差值,受极端气温的影响,当DTR增大时,表明昼夜可能出现极暖或极冷,不利于植被生长。其中,TN10P、DTR与NPP呈显著负相关的区域位于裸露区、覆沙区以及部分覆土区南部,表明相较于覆土区,极端气温对裸露区和覆沙区可能产生更消极的影响。此外,暖极值(TNx、TXx、TN90P、TX90P)、冷极值(TNn、TXn、TX10P)与NPP以负相关关系为主,但几乎未通过显著性检验。总体来说,极暖和极冷均不利于砒砂岩区植被生长。

2.3.2 年NPP与降水的相关性 与极端气温指数相反,极端降水指数与NPP表现为普遍的正相关(图6),且相关系数较高,通过显著性检验的面积更

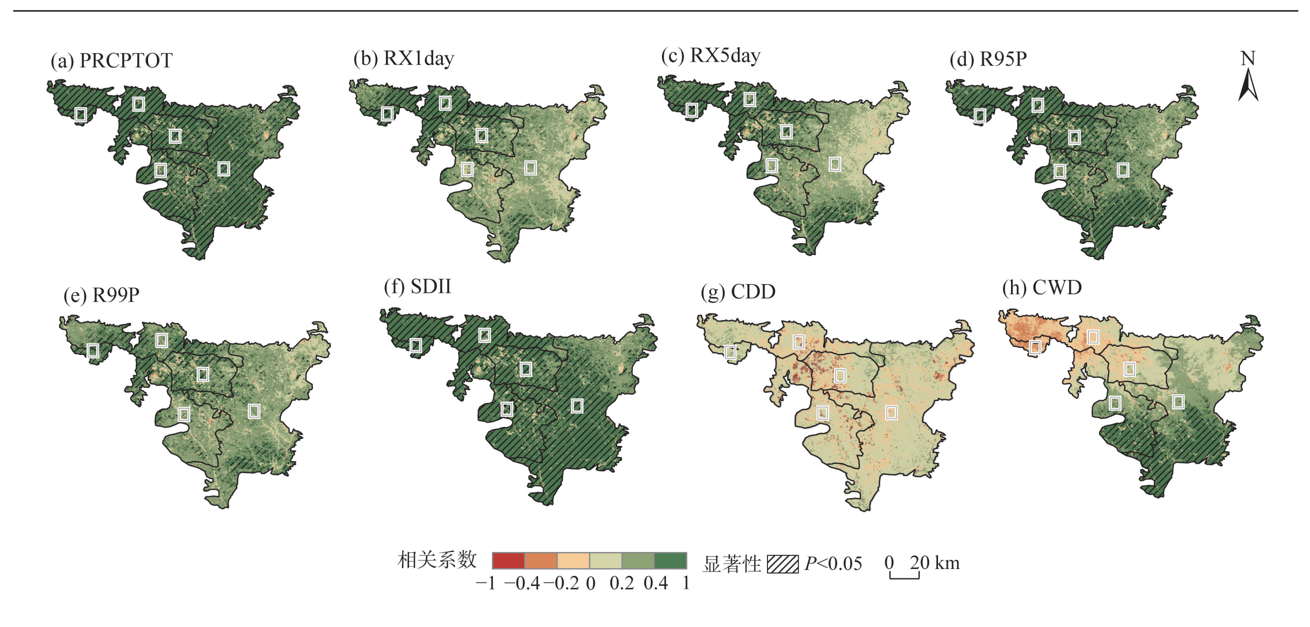


图6 砒砂岩区NPP与极端降水指数相关系数的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of correlation coefficients between NPP and extreme precipitation index in the Pisha sandstone area

大。年总降水量PRCPTOT、年均雨日强度SDII与NPP呈显著正相关的区域覆盖砒砂岩区绝大多数地区。不同强度的极端降水(RX1day、RX5day、R95P、R99P)与NPP均以显著正相关为主,且空间分布上基本一致,呈显著正相关的区域主要分布在裸露区、覆沙区和覆土区的南部。NPP与持续湿润日数CWD呈显著正相关的区域主要分布在砒砂岩区覆土区和覆沙区的南部,这表明短期的强降水有助于缓解旱情,促进裸露区植被生长,而持续降水可能对裸露区植被产生消极影响。此外,NPP与持续干燥日数CDD平均相关系数仅为0.04,且大多数未通过显著性检验。总体来说,研究时段内的总降水量以及降水强度增加对全域NPP均产生了有利影响。这是由于砒砂岩区属于干旱半干旱区,植被生长易受水分的限制,降水增加促进了植被生长。

2.4 砒砂岩区NPP对气候因素的滞后响应

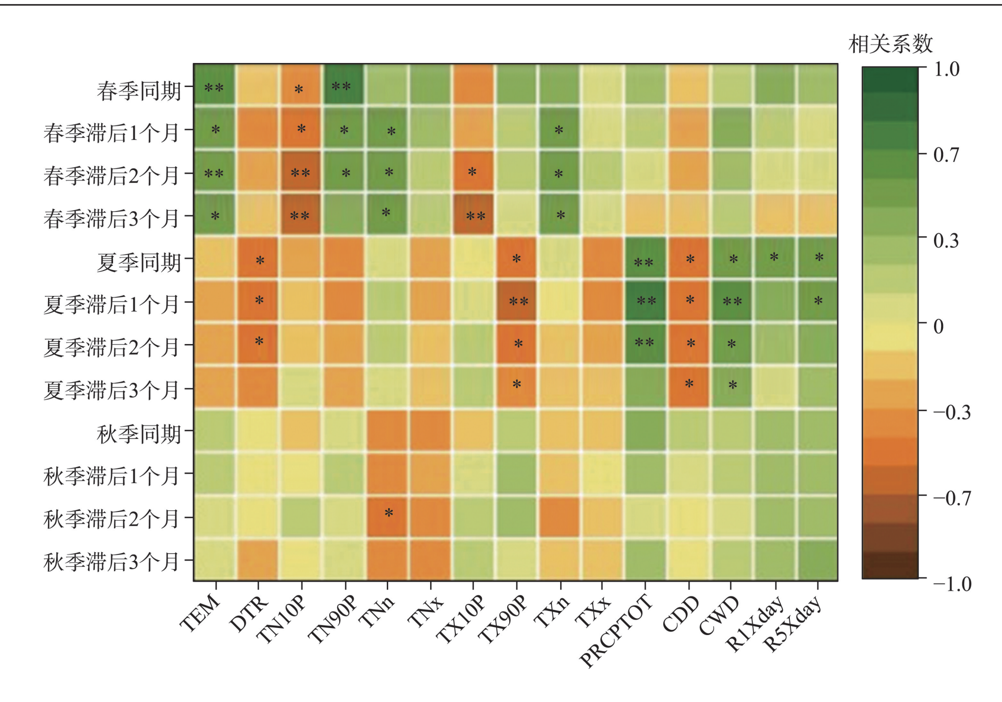
从图7中可以看出,砒砂岩区NPP主要在春季和夏季对气温和降水指标产生显著的响应,且存在一定的滞后性。春季,冷夜日数TN10P与春季同期NPP表现为显著负相关,且存在3个月的滞后效应。暖夜日数TN90P与春季同期NPP表现为极显著正相关,存在2个月的滞后效应。春季平均温度TEM与同期NPP表现为极显著正相关,且存在3个月的滞后效应。总体而言,春季均温升高以及暖夜日数增加均有利于植被NPP增加。而夏季DTR、暖昼日数TX90P与同期NPP表现为显著负相关,分别存在2个月、3个月的滞后效应,表明夏季暖昼日数增加不利于植被生长,但夏季气温日较差减小有利于NPP增加。夏季RX1day、RX5day、CWD、PRCPTOT均与同期NPP表现为显著正相关,且存在不同程度的滞后效应,表明夏季降水增多对砒砂岩区植被生长可产生1~3个月的积极影响。此外,夏季持续干燥日数CDD与NPP表现为显著负相关,且存在3个月的滞后效应,说明夏季干旱会对砒砂岩区植被生长产生滞后3个月的不利影响。

2.5 极端气候对砒砂岩区年NPP变化影响的重要性排序

基于随机森林重要性排序测定各极端气候指数对砒砂岩区NPP变化影响的重要性,结果如图8所示,气温日较差DTR、生长季长度GSL、雨日降水总量PRCPTOT对全域NPP的影响在气候指标中排名前三,且DTR的重要性远大于GSL、PRCPTOT。在裸露区,NPP主要受GSL、PRCPTOT和日最低气温极大值TNx的影响。覆沙区主要受到DTR、暖昼日数TX90P、TNx的影响。覆土区主要受到GSL、DTR和TX90P的影响。

2.6 气候和人类活动对砒砂岩区年NPP变化的相对贡献

结合极端气候对NPP影响的重要性排序结果(图8),得到气温日较差DTR对全域NPP变化的重



注：*表示在0.05水平（双侧）显著；**表示在0.01水平（双侧）显著。

图7　砒砂岩区气温、降水指数与同期、滞后1个月、2个月和3个月NPP的相关性

Fig. 7　Correlation coefficients of precipitation and temperature index with NPP for time lags in the Pisha sandstone area

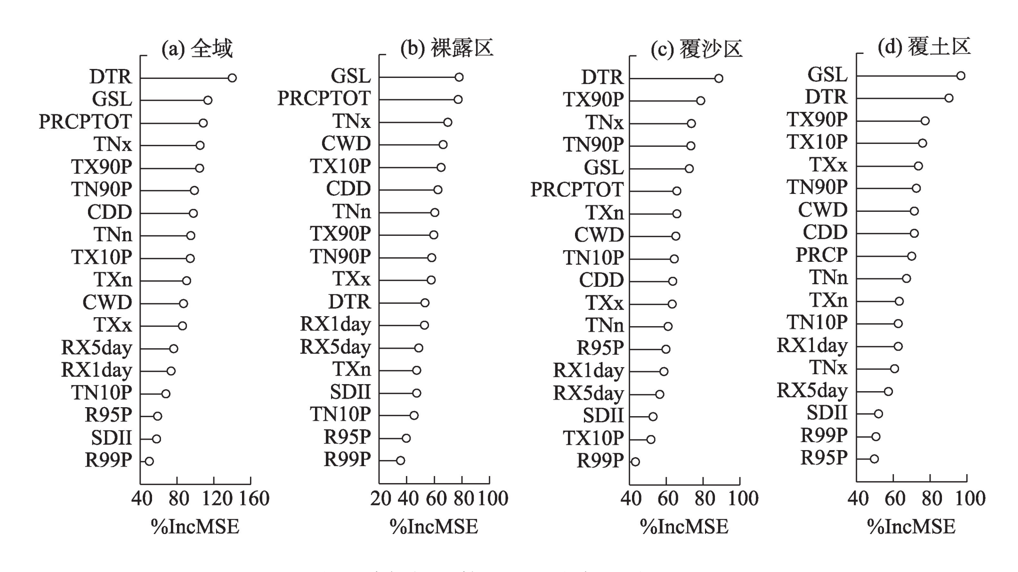


图8　18个极端气候指数对砒砂岩各区域NPP的重要性

Fig. 8　Importance of 18 extreme climate indices to NPP in various regions of the Pisha sandstone area

要性最高，因此，本研究利用多元线性回归构建NPP与年均温度、年降水量以及气温日较差的关系，进行多元线性回归残差和相对贡献分析，得到砒砂岩区NPP变化的驱动因素情况（图9），结果显示，气候因素和人类活动共同作用是砒砂岩区年NPP增加的主要原因，面积约占93.25%。气候因素和人类活动共同导致NPP减少的面积约占1.7%，仅受气候因素积极影响的区域占比为2.7%，因此，砒砂岩区植被NPP变化主要受到气候因素和人类活动的积极促进作用。

进一步分析气候因素和人类活动对砒砂岩区NPP增加的相对贡献（图10），结果显示，砒砂岩区全域平均气候贡献度为50.23%，平均人类活动贡献率为49.77%，气候和人类活动对NPP增加贡献相当。但在砒砂岩不同区域主导因素略有不同，裸露区和覆沙区气候贡献占主导地位（相对贡献率超过50%），覆土区人类活动占主导地位。裸露区平均气候贡献率为62.13%，人类活动贡献率为37.87%。覆

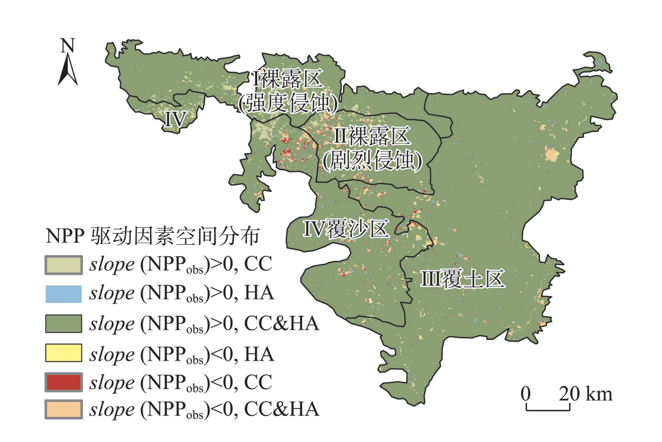


图9 2001—2021年砒砂岩区植被NPP驱动因素空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of NPP drivers in vegetation in the Pisha sandstone area from 2001 to 2021

沙区平均气候贡献率为60.06%,人类活动贡献率为39.94%。覆土区平均气候贡献率为39.60%,人类活动贡献率为60.40%。这与近年来砒砂岩区一系列生态恢复措施的实施密切相关,通过治理水土流失,砒砂岩区植被覆盖度增加,植被生长状态改善。且相较于裸露区和覆沙区,覆土区人类活动对NPP增长贡献起主导作用,植被恢复工程实施效果更为显著。

3 讨 论

3.1 砒砂岩区植被NPP时空变化

2001—2021年砒砂岩区NPP整体呈波动上升趋势,其中,覆土区NPP增长速率高于覆沙区和裸露区,这是由于覆土区土壤养分含量高[32],具有较好的立地条件,生态恢复工程效益在覆土区效益显著,人类活动对覆土区NPP变化的贡献达60.4%,因此,NPP增速最快。而受立地条件等因素的制约,覆沙区和裸露区植被存活率较低[33],植被建设达到的效果相对有限[34],人类活动对NPP增加的贡献小于气候因素。从全域整体来看,人类活动和气候因素对NPP增长的贡献相当,说明砒砂岩区生态恢复措施实施效果显著,但未来NPP由增加变为减少的区域达82.50%,植被退化风险较大,这与Chen等[35]对黄土高原植被研究结果一致,即近21 a来黄土高原NPP有所增加,但在未来很可能无法持续增加。因此,还需要继续实施生态环境保护工程,调整未来植被恢复策略,巩固砒砂岩区植被生态恢复效益,促进植被恢复建设可持续发展。

3.2 气候因素对砒砂岩区NPP的影响

年际尺度上,极端冷、极端暖和气温日较差DTR均与砒砂岩区NPP为负相关,这与刘铮等[36]以黄土高原为研究区的研究结果一致。而年均温度TEM、生长季长度GSL与NPP表现为正相关关系,说明年均温增加,可能通过增加植被生长季长度来促进植被生长发育[37],但温度存在阈值[38],当温度过高时,导致植被呼吸作用增强,植物气孔关闭进而影响植被光合作用[31],温度过低时,植物生长所需的积温不足,植被发育缓慢,不利于植被生长[39]。气温日较差DTR与砒砂岩区NPP主要表现为显著负相关,这与何航等[37]研究发现,中国北方生长季NDVI与DTR呈负相关的结论一致;同时,Xu等[40]也研究发现,中国北方沿海地区NPP与DTR呈负相关。可能是一方面,DTR受温度波动大小的影响,会对植被强制休眠产生作用,影响发芽的频率[41]。另一方面,Wan等[42]通过在中国北方温带草原增温试验研究发现,白天增温不利于植被生长,夜间增温可以促进植被生产力提高,DTR是日最高气温和

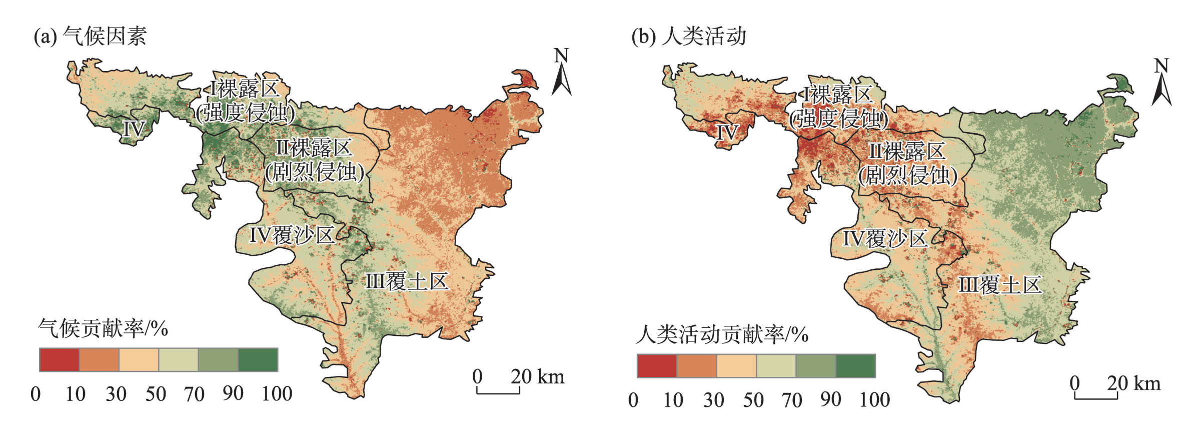


图10 气候因素和人类活动对砒砂岩区NPP的相对贡献

Fig. 10 Relative contributions of climatic factors and human activities to NPP in the Pisha sandstone area

日最低气温的差值,受极端气温的影响,DTR减小即日最高气温降低或日最低气温升高。因此,DTR减小可能有助于砒砂岩区植被生长。相比之下,砒砂岩区年NPP与极端强降水指数均整体表现为正相关关系,这与任晋媛等[43]研究发现,内蒙古NPP与极端降水均呈正相关的结论一致,这是由于砒砂岩区属于半干旱地区,植被生长受降水量限制,且植被恢复导致区域径流和土壤可用水量进一步减少[15],植被需水量增多。因此,目前砒砂岩区年降水量增多和降水强度增大有利于植被NPP增长。季节尺度上,春季均温以及冷极值温度升高均有助于植被生长,这可能与春季增温促进植被生长季提前有关[44],而夏季高温与干旱不利于NPP增加,干旱会影响植被光合作用和呼吸作用,导致植被生长能力下降,削弱碳汇功能[39]。

3.3 人类活动对砒砂岩区NPP的影响

人类活动通过改变砒砂岩区土地利用类型[45],改良砒砂岩区土壤质地,改善立地条件[46],影响林草等植被生长,促进区域植被恢复。目前,砒砂岩区以沙棘生物措施为治理突破口,实施了一系列的生态环境治理工程。1998年水利部正式实施晋陕蒙砒砂岩区沙棘生态工程,2008年开展晋陕蒙砒砂岩区窟野河流域沙棘生态减沙工程,2013年十大孔兑沙棘生态减沙工程实施[47]。砒砂岩区已引入大量水土保持植被如油松、沙棘、柠条等,增加了砒砂岩区植被覆盖度[48],改善了水土流失的程度[49-50]。2001—2021年间砒砂岩区林地和建设用地面积增加,草地、耕地和未利用土地面积减少(表3),林地和建设用地的转化主要来自草地,而砒砂岩区发生土地利用类型转换的面积占总面积的25.12%,土地利用变化区域促进NPP增加量仅占总NPP增加量的24.58%(表4)。说明砒砂岩区NPP增加除了与土地利用类型转换有关,更与未发生土地利用变化区域的植被生长状况改善有关。近20 a来,随着退耕还林、退牧还草等政策的实施,砒砂岩区退化的草地得到了较好的恢复[31],草地NPP增加。且人工种植的沙棘和油松对砒砂岩区土壤碳、氮含量的提升效果较好[51],促进了砒砂岩区林地NPP增加。人类活动对砒砂岩区植被NPP以促进作用为主,这与已有研究结论一致[52-53],表明砒砂岩区植被恢复工程

表3　砒砂岩区2001—2021年土地利用转移矩阵

Tab. 3　Transition matrix of land use types in the Pisha sandstone area between 2001 and 2021　/%

2001年	2021年						转出总量
	草地	建设用地	耕地	林地	水域	未利用土地	
草地	52.94	4.36	4.67	1.47	0.36	0.93	11.80
建设用地	0.19	0.97	0.09	0.02	0.02	0.01	0.33
耕地	5.39	1.70	13.19	0.47	0.26	0.11	7.93
林地	0.70	0.36	0.22	2.63	0.04	0.03	1.35
水域	0.48	0.23	0.30	0.09	1.86	0.04	1.14
未利用土地	2.02	0.27	0.12	0.13	0.04	3.28	2.57
转入总量	8.78	6.92	5.40	2.18	0.72	1.12	25.12

表4　砒砂岩区2001—2021年土地利用变化NPP转移量占比

Tab. 4　Proportion of NPP transferred during the change in land use types in the Pisha sandstone area between 2001 and 2021　/%

2001年	2021年						转出总量
	草地	建设用地	耕地	林地	水域	未利用土地	
草地	55.48	2.91	5.48	1.22	0.33	0.91	10.85
建设用地	0.19	0.81	0.09	0.02	0.01	0.01	0.32
耕地	6.41	1.05	14.70	0.39	0.25	0.11	8.21
林地	0.93	0.30	0.30	2.64	−0.05	0.04	1.52
水域	0.45	0.20	0.27	0.07	1.74	0.03	1.02
未利用土地	2.23	0.19	0.10	0.10	0.04	0.05	2.66
转入总量	10.21	4.65	6.24	1.8	0.58	1.1	24.58

对区域生态环境建设发挥了重要作用。

4 结 论

本文基于CASA模型估算砒砂岩区植被净初级生产力,分析其多年时空变化特征,结合年均温度和18个极端气候指数分析砒砂岩区NPP对气候变化的响应,并进一步计算得到气候和人类活动对NPP的相对贡献。具体结论如下:

(1) 空间分布上,砒砂岩区NPP大小与覆土程度分布一致,即NPP值在覆土区、覆沙区、裸露区逐渐递减。2001—2021年间,砒砂岩各区域NPP呈显著增加趋势,但各区域NPP增长均没有较强持续性,在未来砒砂岩区有82.5%的区域NPP将由增加变为减少趋势,砒砂岩区未来植被仍面临着退化的风险。

(2) 砒砂岩区NPP对各气候指标的响应不同。年际尺度上,与NPP相关性强的气温指标主要是气温日较差DTR、生长季长度GSL、年均气温TEM、冷夜日数TN10P。NPP与TEM、GSL表现为广泛的正相关,而与TN10P、DTR表现为负相关。相反,不同强度的极端降水指数(PRCPTOT、RX1day、RX5day、R95P、R99P、SDII、CWD)与年NPP均为正相关关系,表明当前极端强降水对砒砂岩区NPP起积极影响。季节尺度上,春季和夏季NPP对平均气候态与极端气候的响应具有明显的滞后效应,春季增温有助于NPP增加,夏季降水增多显著促进植被生长,但夏季暖昼日数增加不利于植被生长。

(3) 近年来砒砂岩区一系列生态恢复工程的实施显著促进了植被生长,人类活动和气候变化对全域NPP增长的贡献相当,分别为49.77%和50.23%。各区域上略有不同,裸露区和覆沙区NPP变化以气候因素为主导,气候因素贡献率分别为62.13%和60.06%。覆土区NPP变化以人类活动为主导,人类活动贡献率为60.4%。

(4) 砒砂岩区植被生长受气候因素和人类活动的共同影响,促进砒砂岩区植被稳定健康生长,应持续推进林草植被保护与建设工作,加强土壤侵蚀治理,优化覆土区植被格局,充分发挥覆土区植被恢复潜力,加强对裸露区和覆沙区植被保护工作,并通过人为措施缓解夏季干旱与高温对植被生长的消极影响。

参考文献(References):

[1] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报, 2007, 3(31): 413−424. [Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Zhang Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 3(31): 413−424.]

[2] 陈晓玲, 曾永年. 亚热带山地丘陵区植被NPP时空变化及其与气候因子的关系——以湖南省为例[J]. 地理学报, 2016, 71(1): 35−48. [Chen Xiaoling, Zeng Yongnian. Spatial and temporal variability of the net primary production (NPP) and its relationship with climate factors in subtropical mountainous and hilly regions of China: A case study in Hunan province[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(1): 35−48.]

[3] Ge W, Deng L, Wang F, et al. Quantifying the contributions of human activities and climate change to vegetation net primary productivity dynamics in China from 2001 to 2016[J]. Science of the Total Environment, 2021, 773: 145648, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.145648.

[4] Chen C, Park T, Wang X, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management[J]. Nature sustainability, 2019, 2(2): 122−129.

[5] Piao S, Wang X, Park T, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(1): 14−27.

[6] Higgins S I, Conradi T, Muhoko E. Shifts in vegetation activity of terrestrial ecosystems attributable to climate trends[J]. Nature Geoscience, 2023, 16(2): 147−153.

[7] Wu Z, Dijkstra P, Koch G, et al. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: A meta-analysis of experimental manipulation[J]. Global Change Biology, 2011, 17 (2): 927−942.

[8] 任丽雯, 王兴涛, 刘明春, 等. 石羊河流域植被净初级生产力时空变化及驱动因素[J]. 干旱区研究, 2023, 40(5): 818−828. [Ren Liwen, Wang Xingtao, Liu Mingchun, et al. Temporal and Spatial changes and the driving factors of vegetation NPP in Shiyang River Basin[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(5): 818−828.]

[9] 张赟鑫, 郝海超, 范连连, 等. 中亚草地NPP时空动态及其驱动因素研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 698−707. [Zhang Yunxin, Hao Haichao, Fan Lianlian, et al. Study on spatio-temporal dynamics and driving factors of NPP in Central Asian grassland[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 698−707.]

[10] Liu L, Peng J, Li G, et al. Effects of drought and climate factors on vegetation dynamics in Central Asia from 1982 to 2020[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 328: 116997, doi:10.1016/j.jenvman.2022.116997.

[11] Pan S, Tian H, Dangal S R S, et al. Impacts of climate variability and extremes on global net primary production in the first decade

of the 21st century[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(9): 1027-1044.

[12] Yan W, He Y, Cai Y, et al. Relationship between extreme climate indices and spatiotemporal changes of vegetation on Yunnan Plateau from 1982 to 2019[J]. Global Ecology and Conservation, 2021, 31: e1813, doi: 10.1016/j.gecco.2021.e01813.

[13] Zhao M, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009[J]. Science, 2010, 5994(329): 940-943.

[14] 张彬, 朱建军, 刘华民, 等. 极端降水和极端干旱事件对草原生态系统的影响[J]. 植物生态学报, 2014, 38(9): 1008-1018. [Zhang Bin, Zhu Jianjun, Liu Huamin, et al. Effects of extreme rainfall and drought events on grassland ecosystems[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(9): 1008-1018.]

[15] Feng X, Fu B, Piao S, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019-1022.

[16] Yin L, Dai E, Zheng D, et al. What drives the vegetation dynamics in the Hengduan Mountain region, southwest China: Climate change or human activity?[J]. Ecological Indicators, 2020, 112: 106013, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.106013.

[17] Wang Y, Zhang Z, Chen X. The Dominant Driving Force of Forest Change in the Yangtze River Basin, China: Climate Variation or Anthropogenic Activities?[J]. Forests, 2022, 13(1): 82, doi: 10.3390/f13010082.

[18] 申震洲, 姚文艺, 肖培青, 等. 黄河流域础砂岩区地貌-植被-侵蚀耦合研究进展[J]. 水利水运工程学报, 2020(4): 64-71. [Shen Zhenzhou, Yao Wenyi, Xiao Peiqing, et al. Research progress of spatial distribution about geomorphology-vegetation-water erosion in Pisha stone area of Yellow River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(4): 64-71.]

[19] 童成立, 张文菊, 汤阳, 等. 逐日太阳辐射的模拟计算[J]. 中国农业气象, 2005, 26(3): 165-169. [Tong Chengli, Zhang Wenju, Tang Yang, et al. Estimation of daily solar radiation in China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2005, 26(3): 165-169.]

[20] 施亚林, 曹艳萍, 苗书玲. 黄河流域草地净初级生产力时空动态及其驱动机制[J]. 生态学报, 2023, 43(2): 731-743. [Shi Yalin, Cao Yanping, Miao Shuling. Spatiotemporal dynamics of grassland net primary productivity and its driving mechanisms in the Yellow River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(2): 731-743.]

[21] He Y, Yan W, Cai Y, et al. How does the Net primary productivity respond to the extreme climate under elevation constraints in mountainous areas of Yunnan, China?[J]. Ecological Indicators, 2022, 138: 108817, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108817.

[22] 陈玉森, 艾柯代·艾斯凯尔, 王永东, 等. 1994—2018年哈萨克斯坦首都圈植被NPP时空变化特征及驱动因素[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1917-1929. [Chen Yusen, Akida Askarl, Wang Yongdong, et al. Characteristics and drivers of the spatial-temporal change of net primary productivity in the capital area of Kazakhstan from 1994 to 2018[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1917-1929.]

[23] 邓兴耀, 刘洋, 刘志辉, 等. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 2994-3008. [Deng Xingyao, Liu Yang, Liu Zhihui, et al. Temporal-spatial dynamic change characteristics of evapotranspiration in arid region of Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 2994-3008.]

[24] 宋梦来, 陈海涛, 丁晗, 等. 1990—2020年天津市植被覆盖度时空演变特征及影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 154-163. [Song Menglai, Chen Haitao, Ding Han, et al. Temporal and spatial variation characteristic and influencing factors of vegetation coverage in Tianjin during 1990-2020[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 154-163.]

[25] 徐勇, 郑志威, 戴强玉, 等. 顾及时滞效应的西南地区植被NPP变化归因分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 297-305. [Xu Yong, Zheng Zhiwei, Dai Qiangyu, et al. Attribution analysis of vegetation NPP variation in Southwest China considering time-lag effects[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(9): 297-305.]

[26] 杨丹, 王晓峰. 黄土高原气候和人类活动对植被NPP变化的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 584-593. [Yang Dan, Wang Xiaofeng. Contribution of climatic change and human activities to changes in net primary productivity in the Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 584-593.]

[27] 阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 等. 1981—2013华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 576-592. [A Duo, Zhao Wenji, Gong Zhaoning, et al. Temporal analysis of climate change and its relationship with vegetation cover on the North China plain from 1981 to 2013[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2): 576-592.]

[28] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被NDVI变化的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974. [Jin Kai, Wang Fei, Han Jianqiao, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982-2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 961-974.]

[29] Ma M, Wang Q, Liu R, et al. Effects of climate change and human activities on vegetation coverage change in northern China considering extreme climate and time-lag and-accumulation effects[J]. Science of the Total Environment, 2023, 860: 160527, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160527.

[30] 刘斌, 孙艳玲, 王中良, 等. 华北地区植被覆盖变化及其影响因子的相对作用分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(1): 12-23. [Liu Bin, Sun Yanling, Wang Zhongliang, et al. Analysis of the vegetation cover change and the relative role of its influencing factors in North China[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(1): 12-23.]

[31] 刘洋洋, 王倩, 杨悦, 等. 黄土高原草地净初级生产力时空动态及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2309-2319. [Liu Yangyang, Wang Qian, Yang Yue, et al. Spatial-temporal dynamics of grassland NPP and its driving factors in the Loess Plateau,

China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(7): 2309–2319.]

[32] 李学峰, 饶良懿, 徐也钦. 砒砂岩不同类型区土壤氮磷养分特征[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 139–147. [Li Xuefeng, Rao Liangyi, Xu Yeqin. Characteristics of soil nitrogen and phosphorus nutrients in different Pisha sandstone areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(5): 139–147.]

[33] 杜睿哲, 李文栋, 高文浩, 等. 气候、地表覆被变化对砒砂岩区风蚀时空变化的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 1–10. [Du Ruizhe, Li Wendong, Gao Wenhao, et al. Influence of climate and surface cover changes on spatiotemporal changes of wind erosion in Pisha sandstone area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 1–10.]

[34] 包雪源, 杨振奇, 郭建英, 等. 黄河流域砒砂岩区典型水土保持植被生长特征及限制因素研究[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(1): 50–57. [Bao Xueyuan, Yang Zhenqi, Guo Jianying, et al. Growth characteristics and limiting factors of typical soil and water conservation vegetation in the feldspathic sandstone region of the Yellow River[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(1): 50–57.]

[35] Chen S, Zhang Q, Chen Y, et al. Vegetation change and eco-environmental quality evaluation in the Loess Plateau of China from 2000 to 2020[J]. Remote Sensing, 2023, 15(2): 424.

[36] 刘铮, 杨金贵, 马理辉, 等. 黄土高原草地净初级生产力时空趋势及其驱动因素[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 113–122. [Liu Zheng, Yang Jingui, Ma Lihui, et al. Spatial-temporal trend of grassland net primary production and their driving factors in the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(1): 113–122.]

[37] 何航, 张勃, 侯启, 等. 1982—2015年中国北方生长季NDVI变化及其对气温极值的响应[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 244–253. [He Hang, Zhang Bo, Hou Qi, et al. Spatiotemporal change of NDVI and its response to extreme temperature indices in North China from 1982 to 2015[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 244–253.]

[38] 崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 等. 不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响[J]. 环境科学, 2023: 1–17, doi: 10.13227/j.hjkx.202301118. [Cui Song, Jia Zhaoyang, Guo Liang, et al. Impacts of extreme climate events at different altitudinal gradient on vegetation NPP in Songhua River Basin[J]. Environmental Science, 2023: 1–17, doi: 10.13227/j.hjkx.202301118.]

[39] 朴世龙, 张新平, 陈安平, 等. 极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(9): 1321–1334. [Piao Shilong, Zhang Xinping, Chen Anping, et al. The impacts of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: A review[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 49(9): 1321–1334.]

[40] Xu X, Jiang H, Guan M, et al. Vegetation responses to extreme climatic indices in coastal China from 1986 to 2015[J]. Science of the Total Environment, 2020, 744: 140784, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.140784.

[41] 袁沫汐, 赵林, 李鑫鑫, 等. 1982—2015年中国温带不同草地植被枯黄期对极端气候事件的响应[J]. 生态学报, 2023, 14(43): 1–18. [Yuan Moxi, Zhao Lin, Li Xinxin, et al. Diverse responses of end of growing season to extreme climate events in different grasslands in temperate China during 1982–2015[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 14(43): 1–18.]

[42] Wan S, Xia J, Liu W, et al. Photosynthetic overcompensation under nocturnal warming enhances grassland carbon sequestration [J]. Ecology, 2009, 90(10): 2700–2710.

[43] 任晋媛, 佟斯琴, 包玉海, 等. 内蒙古地区极端气候变化及其对植被净初级生产力的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2410–2420. [Ren Jinyuan, Tong Siqin, Bao Yuhai, et al. Changes of extreme climate and its effect on net primary productivity in Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(8): 2410–2420.]

[44] 赵杰, 杜自强, 武志涛, 等. 中国温带昼夜增温的季节性变化及其对植被动态的影响[J]. 地理学报, 2018, 73(3): 395–404. [Zhao Jie, Du Ziqiang, Wu Zhitao, et al. Seasonal variations of day-and nighttime warming and their effects on vegetation dynamics in China's temperate zone[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(3): 395–404.]

[45] Kou P, Xu Q, Jin Z, et al. Complex anthropogenic interaction on vegetation greening in the Chinese Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2021, 778: 146065, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146065.

[46] 姚文艺, 申震洲, 姚京威, 等. 黄河砒砂岩区生态治理关键技术研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023, 44(5): 1–12. [Yao Wenyi, Shen Zhenzhou, Yao Jingwei, et al. Research on key technologies of ecological control in the Pisha sandstone region of the Yellow River Basin[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2023, 44(5): 1–12.]

[47] 安天杭. 荒山的绿色蜕变——写在晋陕蒙砒砂岩区沙棘生态工程实施20年之际[J]. 中国水利, 2018(21): 12–17. [An Tianhang. Green transformation of barren mountain-tritten 20 years after the implementation of *Seabuckthorn* ecological project in the Pisha sandstone area of Shanxi, Shaanxi and Mongolia[J]. China Water Resources, 2018(21): 12–17.]

[48] 马晓妮, 任宗萍, 谢梦瑶, 等. 砒砂岩区植被覆盖度环境驱动因子量化分析——基于地理探测器[J]. 生态学报, 2022, 42(8): 3389–3399. [Ma Xiaoni, Ren Zongping, Xie Mengyao, et al. Quantitative analysis of environmental driving factors of vegetation coverage in the Pisha sandstone area based on geodetector[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(8): 3389–3399.]

[49] 朱锐鹏, 刘殿君, 张世豪, 等. 黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型水土流失效应[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 10–17. [Zhu Ruipeng, Liu DianJun, Zhang Shihao, et al. Characteristics of runoff and sediment yield in different land use types in hilly and gully

region of the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4): 10-17.]

[50] 杨振奇, 郭建英, 秦富仓, 等. 天然降雨条件下裸露础砂岩区人工植被的减流减沙效应[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 100-104. [Yang Zhenqi, Guo Jianying, Qin Fucang, et al. Effect of artificial vegetation on runoff and sediment reduction by in exposed feldspathic sandstone region under natural rainfall[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1): 100-104.]

[51] 张鹤, 费洪岩, 韩凤朋, 等. 植被恢复和覆土厚度对础砂岩区土壤水分及养分的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 98-106. [Zhang He, Fei Hongyan, Han Fengpeng, et al. Effects of vegetation restoration and soil thickness on soil moisture and nutrient in feldspathic sandstone area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 98-106.]

[52] Gang C, Zhao W, Zhao T, et al. The impacts of land conversion and management measures on the grassland net primary productivity over the Loess Plateau, Northern China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 645: 827-836.

[53] Mu S, Zhou S, Chen Y, et al. Assessing the impact of restoration-induced land conversion and management alternatives on net primary productivity in Inner Mongolian grassland, China[J]. Global and Planetary Change, 2013, 108: 29-41.

Impact of climatic factors and human activities on the net primary productivity of the vegetation in the Pisha sandstone area

WANG Yi'en[1,2], RAO Liangyi[1,2]

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: As a highly serious soil and water loss area in the Loess Plateau, vegetation growth plays an important role in controlling soil erosion and maintaining ecological balance. This study calculated the net primary productivity of vegetation NPP and 18 extreme climate indices in the Pisha sandstone area from 2001 to 2021 based on the CASA model and Rclimdex 1.0, respectively. Trend analysis, correlation analysis, random forest importance ranking, and residual analysis were used to study the spatial-temporal variation of NPP and its response to climate factors in the Pisha sandstone area. The relative contributions of climate factors and human activities to the NPP in the Pisha sandstone area were also calculated. The results showed that (1) NPP variation in all regions of the Pisha sandstone area from 2001 to 2021 had a significant increasing trend, but in the future, 82.5% of the NPP in the Pisha sandstone area will change to a decreasing trend. (2) On the annual scale, NPP correlated positively with average annual temperature, total annual precipitation, and extreme heavy precipitation index and correlated negatively with cold night days TN10P and diurnal temperature range DTR. On the seasonal scale, the increase in average temperature and warm night days in spring was conducive to increase NPP, and there is a lag effect. Increasing the number of warm days in summer was unconducive to vegetation growth, and the NPP has a three-month lag response to the number of warm days in summer. Extreme heavy precipitation in summer was conducive to NPP increase, whereas summer drought was unconducive to vegetation growth, and NPP has a three-month lag response to the number of continuous dry days. (3) Both climate change and human activities contribute positively to NPP in the Pisha sandstone area. The climate contribution of the bare area and the covered sand area is dominant (62.13% and 60.06%, respectively), whereas that of the covered soil area is dominated by human activities (60.40%).

Keywords: Pisha sandstone area; net primary productivity of vegetation(NPP); extreme climate; human activities; residual analysis